

COMMENT PASSER D'UN MODÈLE HYDROLOGIQUE À UN SYSTÈME DE PRÉVISION DES CRUES ? ÉCUEILS LIÉS À LA STRUCTURE DES MODÈLES ET AUX ÉCHELLES D'ESPACE ET DE TEMPS

From simulation to forecasting hydrological models: discussion on structure, time and space scales

Lionel Berthet, Charles Perrin, Vazken Andréassian, Mamoutou Tangara Cécile Loumagne, Maria-Helena Ramos, Nicolas Le Moine

Cemagref, UR HBAN,
BP 44, 92163 Antony Cedex

Tél: +33 (0)1 40 96 65 79, Fax: +33 (0)1 40 96 61 99, e-mail: lionel.berthet@cemagref.fr

Julien Lerat

Cemagref, UMR G-Eau,
361, rue J.F. Breton, BP 5095, 34196 Montpellier Cedex 5

Pierre Javelle

Cemagref, UR OHAX,
275 Route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix en Provence Cedex 5

Les modèles hydrologiques Pluie – Débit sont des outils très utiles pour la prévision des crues. À l'heure actuelle, il n'est pas possible d'utiliser directement les modèles de simulation pour effectuer une bonne prévision. Nous explorons ici les différences entre modèles de simulation et modèles de prévision. Puis nous examinons l'importance relative des informations apportées au modèle : dans le passé, les forçages climatiques et les dernières observations de débit ; dans le futur, les prévisions de précipitations. La question des échelles spatiales est ensuite abordée et les limites d'une approche globale sont discutées dans une perspective opérationnelle.

Rainfall – Runoff models are very useful tools for flood forecasting. As of today, the direct use of simulation models is not possible to get accurate predictions especially when it concerns short-term forecasting. In this paper, we explore the main differences between simulation and forecasting models. Then we assess the relative importance of every information provided to the model: the past climatic forcing and the last observed discharges; the future precipitation scenarios. Spatial scales are also examined and the limits of a global forecasting approach for operational purposes are discussed.

I INTRODUCTION ET OBJECTIFS

La prévision des crues s'inscrit dans la charnière de l'hydrométéorologie : c'est un exercice qui bénéficie du dialogue entre météorologues et hydrologues. La modélisation hydrologique a connu au cours des trente dernières années un formidable essor, avec une multiplication considérable des modèles développés à travers le monde, comme en témoigne l'abondante littérature produite à ce sujet [7,8]. Des modèles hydrologiques sont aujourd'hui largement utilisés en ingénierie, pour résoudre des problèmes de gestion et de prévision, à court, moyen et long terme.

Le développement de modèles hydrologiques de prévision des crues (prévision à court terme) a reçu une attention toute particulière, en raison des enjeux humains et économiques liés à ces événements. Aujourd'hui, les services chargés de la prévision des crues, en France comme à l'étranger, utilisent tous des modèles de prévision comme outils d'aide aux prévisionnistes.

Le transfert d'un modèle du monde de la recherche au monde opérationnel peut poser de nombreux problèmes. Il faut reconnaître que les modèles développés au sein de laboratoires de recherche ne sont souvent pas adaptés aux rigueurs de l'exercice de prévision des crues. Se posent d'une part des problèmes techniques essentiels comme la chaîne d'alimentation en données temps réel, la fiabilité de

l'algorithme et l'ergonomie du logiciel. Il existe d'autre part un certain nombre de difficultés conceptuelles qui, si elles sont négligées, peuvent limiter fortement, les performances des modèles hydrologiques lors de leur passage de la phase de développement à la phase d'application.

Nous présentons ici l'expérience du Cemagref (Antony) dans le passage en opérationnel de modèles hydrologiques, que nous illustrons au travers de trois points essentiels pour la prévision des crues. Nous insistons d'abord sur ce qui fait la spécificité de la prévision par rapport à la simple simulation des débits et les conséquences que cela entraîne dans la construction des modèles et la prise en compte des informations disponibles. Nous nous interrogeons ensuite sur les questions d'échelles de temps, en montrant comment la modélisation peut être une aide à la détermination des temps caractéristiques de la prévision. Enfin, nous montrons comment le test d'un modèle sur des cas d'études très différents peut aider à une meilleure évaluation des champs d'application des modèles globaux pour la prévision des crues.

II BASSINS ET MODÈLE

Dans ce qui suit, nous utiliserons essentiellement :

- le modèle hydrologique de prévision GR3P développé sous l'impulsion de Claude Michel au Cemagref aux pas de temps journalier [9] et horaire [2].
- un échantillon de bassins versants répartis sur le territoire métropolitain français, pour lesquels nous disposons de chroniques de données horaires continues sur la période 1995-2005.

L'essentiel des résultats présentés ici sont issus des travaux de [2]. Ils ont été obtenus sur la base de tests réalisés sur un grand nombre de bassins versants français, afin de garantir la généralité des conclusions. Cependant, nous avons sélectionné ici quatre bassins jugés intéressants pour illustrer plus concrètement les problèmes soulevés dans cet article. Il s'agit d'une part de l'Orgeval à Boissy-le-Châtel (104 km²), bassin plutôt rapide, d'autre part de l'Yèvre à Savigny-en-Septaine (531 km²), la Saône à Gray (5 390 km²) et de la Seine à Paris (43 800 km²), bassins plutôt lents.

III COMMENT PASSER D'UN MODÈLE DE SIMULATION A UN MODÈLE DE PRÉVISION ?

Comme nous allons le voir plus bas, la grande majorité des modèles de « recherche » fonctionnent en mode *simulation* (et non pas en mode *prévision*), ce qui constitue un handicap important pour concevoir les modalités de transfert vers les opérationnels.

III.1 Simulation et prévision : quelle différence?

Il est tout d'abord essentiel de définir ce que représentent les deux modes d'application des modèles hydrologiques que sont la « simulation » et la « prévision » (voir illustration Figure 1) :

- la **simulation** consiste à calculer le débit du pas de temps i à partir de l'observation d'un certain nombre de variables de forçage (essentiellement la pluie mais éventuellement aussi la température, l'évapotranspiration potentielle, etc.) jusqu'à ce pas de temps i .
- la **prévision** consiste à calculer le débit du pas de temps $i+1$ au pas de temps $i+H$ (où H est l'horizon de prévision) sur la base de la même connaissance qu'en simulation jusqu'à l'instant i , à laquelle s'ajoutent :
 - la connaissance des débits jusqu'à i , et
 - un scénario des pluies futures (et éventuellement d'autres variables de forçages nécessaires pour le modèle) entre les pas de temps $i+1$ et $i+H$.

Dans les deux cas, le modèle hydrologique représente la fonction de transformation des pluies en débits opérée par le système bassin versant. Il dépend d'un jeu de paramètres à caler sur le bassin et comporte éventuellement des variables internes (qui évoluent au cours du temps en fonction des observations météorologiques) donnant une représentation des processus de transformation en jeu.

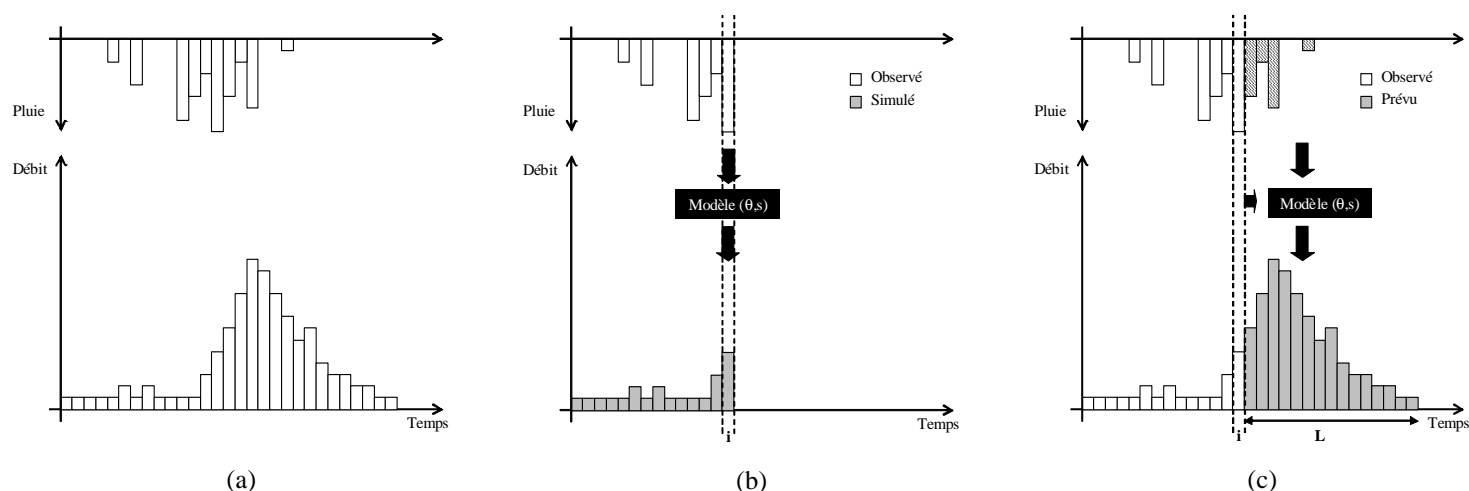


Figure 1 : Illustration des différences entre simulation et prévision en modélisation hydrologique. (a) événement observé ; (b) application du mode simulation au pas de temps courant i ; (c) application du mode prévision au pas de temps courant i et pour un horizon H .

La distinction entre simulation et prévision n'est pas toujours faite, et c'est la cause d'un grand nombre de quiproquos entre modélisateurs et opérationnels... et de déceptions de la part de ces derniers.

III.2 Conséquences pour la mise en œuvre des modèles hydrologiques en prévision

Bien que la distinction entre *simulation* et *prévision* reçoive peu d'attention parmi les modélisateurs, notre expérience indique que ces deux modes d'application sont en fait radicalement différents pour au moins deux raisons :

- les buts de modélisation sont différents ;
- l'information disponible est différente : la prévision dispose en plus d'observations de débit mais doit faire des hypothèses sur la pluie future.

Ces différences entre simulation et prévision nous ont mené à nous poser un certain nombre de questions :

- les structures de modèles hydrologiques de prévision et de simulation, qui s'appuient dans les deux cas sur une même représentation du fonctionnement du bassin versant, doivent-elles être semblables ou faut-il essayer d'ajuster modèle et objectif de modélisation ?
- les paramètres d'un modèle appliqué en simulation et en prévision doivent-ils être différents ?
- quel est l'impact du surcroît d'information dont bénéficiera un modèle de prévision sur ses performances ?

Nos travaux des dix dernières années ainsi que de nombreux travaux de prévision de crue rapportés dans la littérature montrent que les débits observés jusqu'à l'instant de prévision constituent une information essentielle pour le bon fonctionnement des modèles de prévision. Un modèle de prévision n'exploitant pas cette information obtient des performances nettement moins bonnes qu'un modèle y ayant accès.

Le débit observé est valorisé soit en l'utilisant comme entrée du modèle, soit le plus souvent par une procédure d'assimilation (ou mise à jour) utilisée conjointement avec le modèle hydrologique, qui permet d'exploiter l'information de cette variable exogène.

III.3 Exemple de l'Yèvre

On illustre l'intérêt de l'utilisation des derniers débits observés sur l'exemple de l'Yèvre à Savigny-en-Septaine en utilisant le modèle de prévision GR3P. La Figure 2 montre la série des erreurs obtenues pour une prévision à 6 h, avec et sans assimilation du dernier débit. L'erreur, représentée au-dessus de l'hydrogramme observé, est beaucoup moins importante et moins auto corrélée avec l'assimilation du dernier débit que sans.

En testant ces deux types de configuration sur un grand nombre de bassins versants, on a pu confirmer le gain important de performance dès lors que l'on valorise l'information sur les derniers débits observés [2]. L'exemple de la Figure 2 illustre le fait que la disponibilité des débits observés modifie fondamentalement la problématique de modélisation : *simulation* et *prévision* des débits conduisent à des résultats très différents.

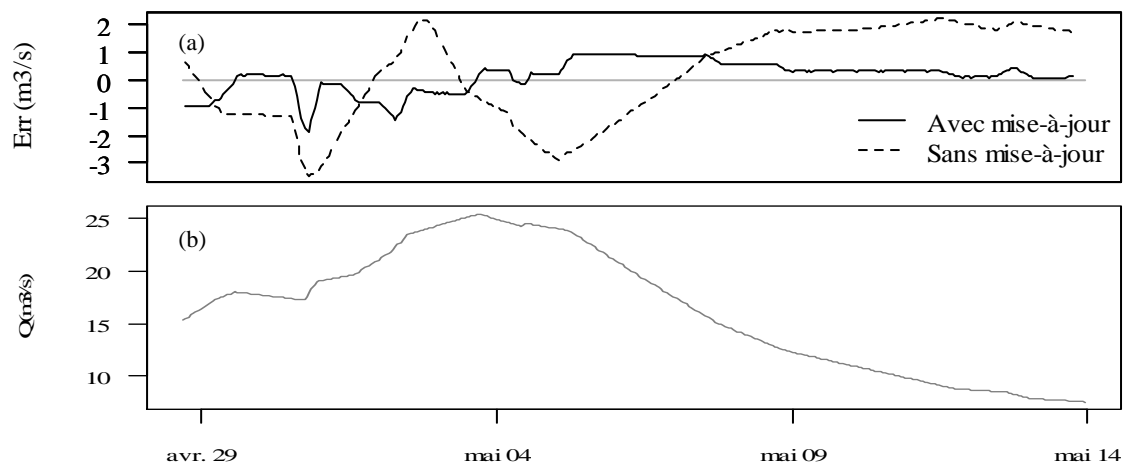


Figure 2 : (a) Comparaison des erreurs du modèle GR3P appliqué sans et avec mise à jour pour une prévision à 6 h et (b) débit observé sur le bassin versant de l'Yèvre à Savigny-en-Septaine (531 km²) pour la crue du 28 avril au 13 mai 1998. Les prévisions sont effectuées pour un horizon de 6 heures. L'erreur avec mise-à-jour est plus faible que sans mise-à-jour et est moins corrélée.

IV LE PASSÉ : LE BASSIN VERSANT OUBLIE VITE

IV.1 Quelle durée de vie pour l'information « débits observés » ?

Nous avons souligné précédemment que ce qui différencie l'utilisation d'un modèle en mode prévision et en mode simulation. Une différence forte vient de l'exploitation des derniers débits observés (et / ou des dernières erreurs du modèle). De nombreuses techniques d'assimilation des débits existent [6]. Elles ont été construites en fonction de l'origine suspectée des incertitudes sur la prévision : mise à jour des entrées, des états ou paramètres du modèle, des sorties ou de la structure elle-même (approche multi-modèle). Le choix d'une des techniques existantes n'est pas simple, car il dépend notamment de :

- la dynamique propre du bassin, et la persistance de l'influence des conditions initiales au pas de temps j de prévision sur les débits futurs. La « mémoire » à court terme des bassins versants peut en effet être très variable. Cette mémoire peut avoir une influence sur la façon dont on prend en charge le débit dans le modèle ;
- le délai de prévision visé : plus le délai sera long, moins le débit observé à l'instant de prévision apportera d'information utile.

Les tests réalisés au Cemagref montrent que la mise à jour du modèle a une durée de vie limitée. Son effet décroît avec le temps et cette décroissance dépend fortement de la technique utilisée. Dans le modèle actuellement diffusé, GR3P, deux procédures sont utilisées : (1) une réinitialisation du réservoir qui assure le routage au sein du modèle en fonction du débit observé au pas de temps i et (2) une correction des sorties en fonction de l'erreur de prévision constatée au pas de temps précédent.

La Figure 3 montre deux exemples de prévisions du modèle réalisées sur les bassins tests avec (a) et sans (b) mise à jour. On constate que les prévisions réalisées rejoignent progressivement la simulation.

La correction des sorties s'estompe souvent beaucoup plus rapidement que la mise à jour de réservoir. Si l'on s'intéressait à de longs délais (prévision à moyenne échéance à 10 jours), l'impact des mises à jour (au pas de temps horaire considéré ici) serait très faible. Plus généralement, la dynamique d'atténuation des mises à jour dépendra de la dynamique propre du bassin, du nombre de pas de temps pour atteindre l'échéance et du scénario de pluie future utilisé. Ce dernier deviendra de toute façon

prépondérant dans l'erreur du modèle à longue échéance (la part de l'erreur due au scénario de pluies futures devenant alors majoritaire face aux autres sources d'erreur).

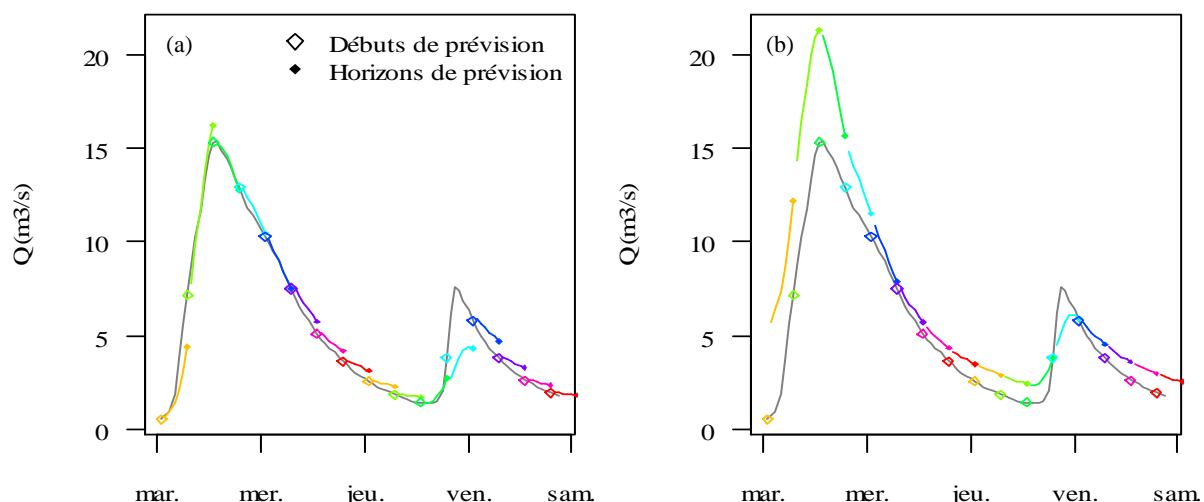


Figure 3. Exemple de prévision à 6 heures réalisée sur l'Orgeval avec le modèle GR3P avec (a) et sans (b) mise-à-jour du 19 mars au 22 mars 2002. La mise-à-jour permet d'améliorer nettement les prévisions sur les deux pics de crue.

IV.2 Le débit observé contient-il suffisamment d'information ?

Le débit observé à l'instant de la prévision constitue une information très précieuse car il intègre le fonctionnement du bassin. Cependant, il n'est souvent pas suffisant pour déterminer à lui seul les conditions initiales. La prise en compte de l'historique des conditions d'humidité antérieures, par une approche continue sur une durée suffisamment longue (qui en prévision n'est pas forcément très longue), permet d'améliorer significativement les résultats des modèles de prévision [1]. Les problèmes d'initialisation rencontrés par les modèles événementiels militent également pour une intégration des conditions antérieures dans les approches de prévision.

Les systèmes opérationnels de prévision hydrométéorologique les plus avancés dans le monde (Etats-Unis (NWS), Angleterre, Suède (SMHI), etc.) reposent d'ailleurs sur des modèles de prévision continus.

IV.3 Choix d'un objectif pour le calage du modèle de prévision

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le modèle hydrologique utilisé pour la prévision est généralement calé pour la simulation, puis utilisé conjointement à une procédure de mise à jour pour fonctionner en prévision. Cette pratique est souvent sous-optimale car les buts de la simulation et de la prévision sont nettement différents. Il est préférable alors de s'intéresser dès le départ à l'objectif final qu'est la prévision. Cette approche de calage en simulation ignore donc en fait les spécificités de l'exercice pour lequel on développe le modèle.

Les travaux que nous avons menés au Cemagref ont démontré clairement qu'un modèle fonctionne d'autant mieux que l'objectif d'application a été pris en compte lors du calage via la fonction objectif appropriée [5]. La prévision n'échappe pas à cette règle. Pour une prévision à H pas de temps, il faut donc une fonction objectif prenant en compte l'erreur en prévision pour ce délai pour caler les paramètres du modèle.

La sensibilité des résultats du modèle à la fonction objectif est illustrée à la Figure 4 qui compare l'erreur de prévision à H pas de temps en contrôle lorsque le calage est effectué :

- en simulation,
- avec un horizon de prévision inférieur à l'horizon de prévision cible (ici 6 heures),
- avec un horizon de prévision égal à l'horizon de prévision cible,
- avec un horizon de prévision supérieur à l'horizon de prévision cible.

On constate que les meilleurs résultats sont obtenus en calant le modèle pour l'objectif attendu (prévision à H heures). Les autres conditions de calage, si elles ne dégradent pas forcément les résultats de manière très significative, sont sous-optimales. Ces conclusions sont généralisables lorsque l'on travaille sur un grand nombre de cas.

On notera que l'erreur utilisée ici comme fonction objectif est une erreur quadratique moyenne, mais le modèle peut être calé via une fonction objectif plus directement en adéquation avec les critères de qualité jugés pertinents par le service de prévision de crue et qui serviront à évaluer ses performances [3].

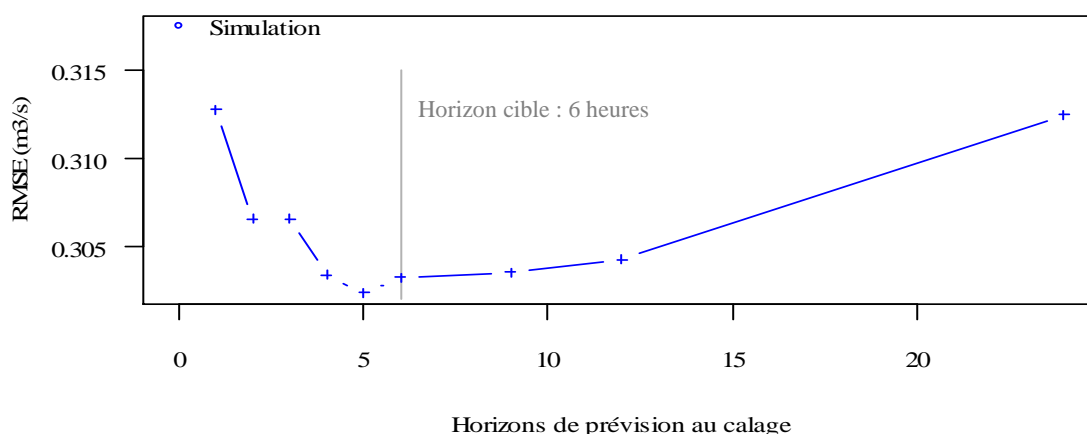


Figure 4 : Performance du modèle de prévision sur le bassin de l'Orgeval pour un horizon de 6 h avec un calage en simulation (°, un calage unique indépendant de l'horizon), avec un calage en prévision à différents horizons (+). Les meilleures performances au contrôle sont obtenues pour un jeu de paramètres calé alors que le modèle fonctionne en prévision à un horizon proche de l'horizon cible (i.e. l'horizon auquel le modèle est évalué en contrôle).

V LE FUTUR : RÔLE DES PRÉVISIONS DE PLUIE À VENIR

La qualité de la prévision de pluie est souvent considérée comme déterminante pour avoir de bonnes prévisions de pluie. Ce point est analysé ici.

V.1 Détermination d'un délai maximum atteignable sans prévision de pluie

La prévision du modèle hydrologique sera partiellement influencée par les prévisions de pluie future. Ceci est bien connu, mais il est plus rarement noté que cela va en fait dépendre du rapport entre le délai de prévision ciblé par rapport au temps caractéristique de réponse du bassin. Sur les bassins jaugés, ce temps caractéristique est souvent estimé par analyse des hyétogrammes et hydrogrammes correspondants. Cette analyse est cependant souvent assez complexe, car elle fait de nombreuses hypothèses (séparation de l'écoulement de base, identification des événements, détermination de la pluie efficace, etc.), et peut être remplacée par une approche plus directe.

Pour estimer le délai maximum de prévision que l'on peut atteindre sans avoir recours à une précision de pluie, il suffit d'appliquer le modèle de prévision préalablement calé en considérant deux scénarios de pluie différents sur une période assez longue pour avoir une série représentative d'événements. Dans les deux cas, on trace l'évolution de l'erreur moyenne du modèle en fonction du délai de prévision. En pratique, il est commode d'utiliser comme scénarios (1) un scénario de pluie future nulle et (2) un scénario de pluie future parfaitement connue. Ces deux scénarios, bien qu'ils soient peu réalistes en conditions opérationnelles, ont comme avantage d'être radicalement différents et donc d'engendrer des réponses du modèle très contrastées : on compare le scénario des pluies qui seront observées à un scénario manifestement faux.

La Figure 5 montre l'évolution de l'erreur quadratique moyenne sur les bassins de l'Orgeval et de la Saône. Cette erreur augmente naturellement avec le délai de prévision. On constate que jusqu'à un délai noté H_{max} , l'erreur du modèle est indépendante du scénario de pluie choisi. Cela ne signifie pas que le modèle ne sait pas prendre en compte le scénario, mais bien que la pluie tombée au pas de

temps $i+1$ n'aura aucun impact significatif pendant une période de longueur H_{max} . Sur cette plage, l'incertitude sur la prévision ne sera donc due qu'aux conditions passées et aux erreurs de modélisation. Au-delà, la prévision sera dépendante du scénario de pluie future choisi, et ce d'autant plus que le délai s'allonge.

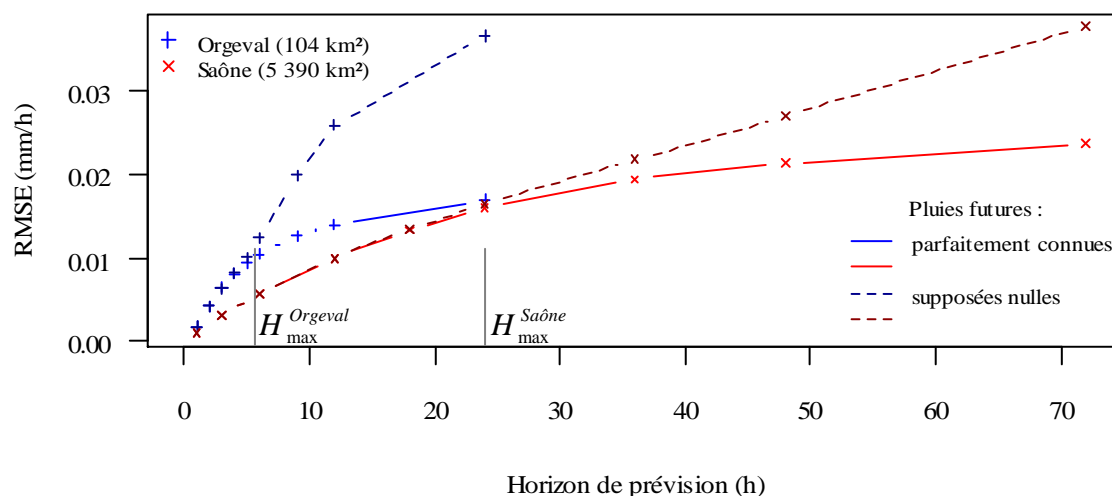


Figure 5 : Evolution de l'erreur quadratique moyenne du modèle de prévision en fonction de l'horizon de prévision pour deux scénarios de pluie future différents (pluie nulle et pluie parfaitement connue). Le scénario de pluies futures n'a pas d'influence sur les performances du modèle jusqu'à un horizon de 6 heures pour le bassin rapide, jusqu'à un horizon de 24 heures pour le bassin plus lent.

Notons que le délai H_{max} ainsi déterminé est un temps moyen estimé sur l'ensemble des événements ayant servi au calage du modèle (c'est-à-dire à la détermination de ses paramètres). Si ce calage était effectué crue par crue, on se rendrait compte que H_{max} est sujet à certaines variations (due notamment à la variabilité spatiale des pluies et des conditions d'humidité du bassin). Cependant, dans un contexte de prévision, il n'est pas possible de connaître a priori le délai d'influence de la pluie sur un événement donné.

Ce temps H_{max} entièrement déterminé par le modèle et ses conditions de calage, peut ensuite servir de base à la détermination du pas de temps le mieux approprié pour la modélisation sur le bassin [4]. Rappelons cependant que la dynamique propre du bassin n'est pas la seule à conditionner le choix du pas de temps, mais que les contraintes d'utilisation et les objectifs de prévision sont également à prendre en compte.

V.2 Choix d'un scénario de pluie pour le calage du modèle

Le choix d'un scénario de pluies futures pour le calage du modèle ne peut influencer ce dernier de manière significative qu'au-delà de H_{max} . Utiliser des scénarios de pluies "futures" observées permet de caler au mieux les paramètres au sens du modèle mais peut conduire à une surévaluation des capacités prédictives du modèle quand il est employé avec des vraies prévisions de pluie.

V.3 H_{max} dépend-t-il de la taille du bassin versant ?

Intuitivement, on a tendance à penser que H_{max} dépend directement de la superficie du bassin versant. Pour tester cet a priori, nous présentons en Figure 6 le délai H_{max} en fonction de la superficie du bassin pour plus d'un millier de bassins versants français. Si on vérifie que H_{max} a effectivement tendance à augmenter avec la superficie du bassin, la corrélation est ténue : à une même valeur de H_{max} peut correspondre à une gamme de superficies assez étendue (s'étendant sur un ordre de grandeur !). Ce faible lien traduit le fait que d'autres caractéristiques influent sur H_{max} , notamment la géologie et la pédologie, la densité de drainage ou la pente du bassin.

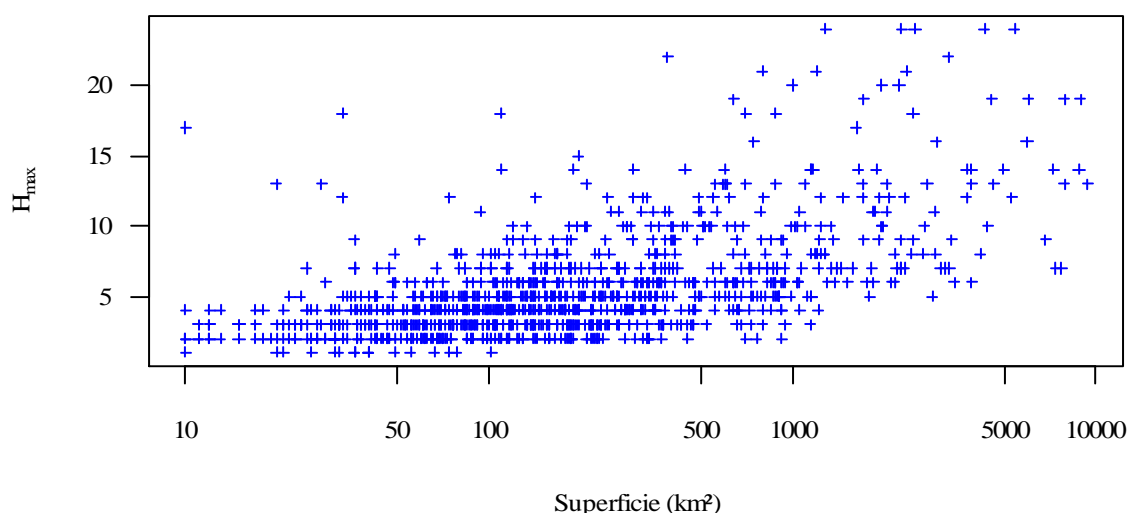


Figure 6 : Lien entre H_{max} et la superficie du bassin versant sur un millier de bassins versants français. S'il existe une tendance manifeste (plus un bassin est grand, plus on peut attendre en moyenne, une valeur de H_{max} élevée), la corrélation reste très faible : on peut trouver des petits bassins présentant des valeurs de H_{max} élevée et vice-versa.

VI FAUT-IL RESTREINDRE L'UTILISATION DES MODELES GLOBAUX AUX TETES DE BASSIN ?

Les résultats des tests présentés jusqu'ici ont été réalisés avec un modèle hydrologique global. Par global, nous entendons un modèle appliqué à l'échelle du bassin versant sans prise en compte explicite de son hétérogénéité ou de son découpage hydrographique. Nous analysons dans cette partie les avantages et limites potentiels de cette approche.

VI.1 Avantages pratiques et théoriques d'une modélisation globale

La modélisation globale présente plusieurs caractères intéressants pour les conditions opérationnelles :

- elle demande une faible quantité de données (pas de découpage du bassin nécessitant des entrées spatialisées) ;
- elle repose sur une algorithmique simple puisque le modèle n'est composé que d'une maille ;
- elle ne requiert qu'un faible nombre de paramètres (or le nombre de paramètres qu'on peut déterminer à partir des chroniques de pluie et de débit est généralement faible).

C'est donc une approche facile à mettre en œuvre et surtout, robuste.

Un reproche a priori souvent fait à l'approche globale est qu'elle n'est pas applicable aux grands bassins versants. Elle est notamment pointée du doigt sur les problèmes de prise en compte de réactions très différenciées de deux sous-bassins amont, qui peuvent être dues à la variabilité spatiale des pluies et / ou à des comportements hydrologiques très contrastés. L'approche globale n'est en effet pas construite pour rendre compte de telles configurations, et une approche semi-distribuée est souvent préconisée pour pallier ce problème.

Les travaux menés au Cemagref au cours des dernières années ont montré qu'en pratique, la différenciation de deux (ou un plus grand nombre de) sous-bassins amont nécessite une complexification du modèle de prévision (qui doit alors comprendre des outils de propagation et une prise en compte des apports intermédiaires), ce qui est le plus souvent nocif aux performances du modèle. La grande majorité des études de comparaisons de modèles hydrologiques adoptant des approches de discrétisation spatiale différentes montrent une faible amélioration aux courtes échéances (au prix de plus de données et de contraintes opérationnelles), qui s'estompe (et parfois s'inverse) aux longues échéances.

Dès lors que l'on s'intéresse à des délais où l'hydrologie à un rôle dominant sur les phénomènes hydrauliques, l'approche globale a donc toute sa place, quelque soit la taille du bassin versant

considéré. Ce résultat est en partie dû au fait que l'augmentation de l'hétérogénéité constatée sur le bassin avec l'augmentation de sa taille est compensée par l'effet de lissage opéré par le bassin sur les forçages climatiques, lissage qui rend la réponse du bassin davantage prédictible.

Notons par ailleurs que l'augmentation de l'incertitude sur les prévisions de pluie avec l'augmentation du délai de prévision aura aussi naturellement tendance à privilégier les approches les plus simples, qui sont souvent les plus robustes.

VI.2 La performance des modèles globaux dépend-elle de la taille des bassins versants ?

Nous avons évalué les capacités prédictives du modèle global sur notre échantillon d'un millier de bassins versants en fonction de leurs superficies. Pour chaque bassin, nous avons considéré le délai H_{max} comme horizon cible de prévision. Pour avoir un indice d'efficacité du modèle comparable d'un bassin à un autre, nous avons normé l'erreur quadratique du modèle par l'erreur d'un modèle naïf ne dépendant que des observations et supposant l'invariance du débit à partir de l'instant de prévision (critère de persistance). Le critère ainsi défini vaut 1 pour un modèle parfait et 0 pour un modèle équivalent en qualité au modèle naïf. Il est négatif pour un modèle moins performant que le modèle naïf.

De manière intéressante, la Figure 7 montre que le modèle a d'autant moins de chance d'être mauvais que le bassin est grand ! Si cela ne préjuge pas de la qualité relative du modèle global par rapport à une autre approche, cela est cependant rassurant sur les capacités d'un modèle global à donner des résultats encourageants même sur de grands bassins.

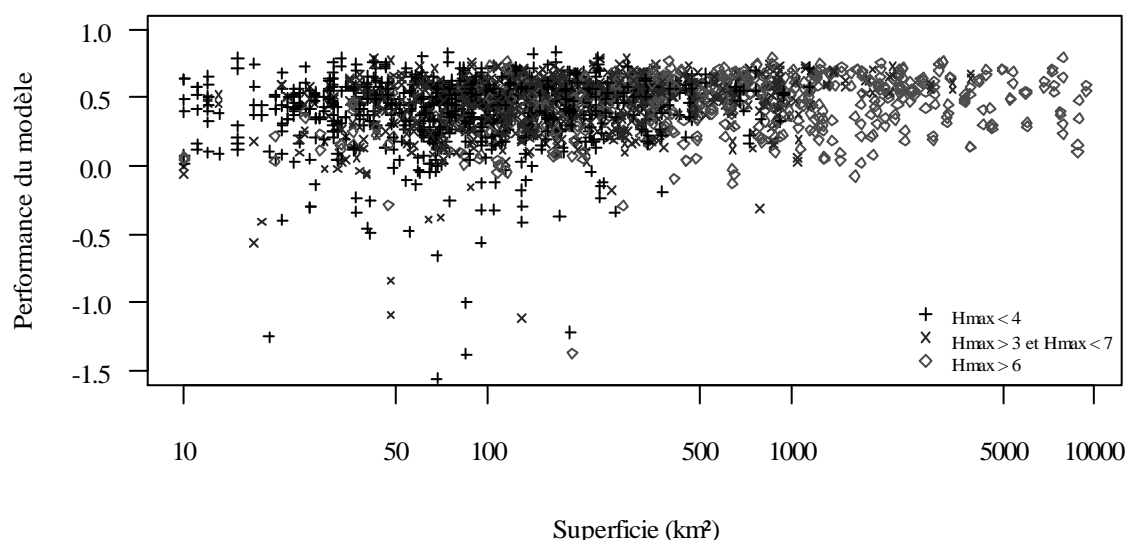


Figure 7 : Efficacité du modèle de prévision (critère de persistance) en fonction de la superficie du bassin. Plus la superficie d'un bassin est grande, moins la probabilité que le modèle soit mauvais est élevée : le modèle global donne des résultats satisfaisants même sur les plus grands bassins.

VI.3 Le cas de la Seine à Paris Austerlitz

L'exemple du bassin de la Seine à Paris Austerlitz (43 800 km²) est caractéristique. Si, à horizon court (inférieur à 24 heures), le modèle global GR3P est moins bon qu'un modèle semi-distribué, l'inverse se produit pour des horizons plus longs. Notons que l'approche semi-distribuée fait appel à une plus grande quantité d'observations pour les délais courts (débits amont notamment), ce qui explique en partie ce résultat.

Il ne faut pas conclure de ces remarques que l'approche globale est la panacée. Elle représente seulement, à l'heure actuelle, parmi les approches hydrologiques existantes en prévision, un compromis très intéressant entre performance des modèles et niveau de complexité.

VII CONCLUSIONS

Les méthodes hydrologiques de prévision des crues restent encore largement imparfaites, de telle sorte que les services opérationnels ont de réelles attentes face à la recherche. Tous les modèles de recherche ne sont pas aptes à servir en opérationnel, et nous avons montré qu'au-delà des problèmes pratiques (alimentation en données) il existait de nombreux écueils conceptuels et culturels.

La mise au point d'un modèle de prévision efficace résulte d'un ensemble de facteurs, parmi lesquels on aura la détermination de la résultante des conditions antérieures d'humidité, la persistance d'une modification des conditions initiales, la dynamique temporelle (auto corrélation) des erreurs du modèle ou le rôle des prévisions de pluie.

Les recherches effectuées jusqu'à présent au Cemagref d'Antony, qui s'appliquent à tester de très nombreuses variantes d'approches de prévision, convergent vers la structure du modèle GR3P, qui se caractérise par :

- une approche globale, peu exigeante en données et applicable sur un large spectre de superficies de bassins ;
- un fonctionnement continu, qui permet notamment un calcul du rendement du bassin basé sur la résultante des conditions antérieures d'humidité ;
- une exploitation directe du dernier débit observé, utilisé comme entrée du modèle et permettant une mise à jour de l'état interne du modèle dont dépend de façon univoque le débit simulé. Cette procédure de mise à jour à une mémoire directement liée à la dynamique même du bassin ;
- l'utilisation de l'erreur en prévision sur le dernier débit observé. Cette procédure a une mémoire courte, et est donc particulièrement intéressante pour les faibles horizons de prévision.

Ce modèle est intégré dans le logiciel de prévision VIGIE, actuellement diffusé par le Cemagref. Déjà installé dans plusieurs SPC (Seine-Yonne-Loing, Vilaine, Nord-Pas-de-Calais), il bénéficie d'une évaluation sur une large partie du territoire.

Si ce modèle a été largement éprouvé par des tests systématiques aux pas de temps journaliers et horaires, la pratique opérationnelle et les retours d'expérience restent bien entendu indispensables pour en améliorer encore la fiabilité.

VIII REFERENCES

- [1] Anctil, F., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V. (2004). A soil moisture index as an auxiliary ANN input for stream flow forecasting. *Journal of Hydrology*, **286**, 155-167.
- [2] Berthet, L. (2007). Mise au point d'un modèle hydrologique de prévision des crues à pas de temps fin. *Thèse en cours, Cemagref Antony*.
- [3] Lacaze Y., Javelle P., Goutx D. et Berthet L. (2008). Influence des pluies futures sur la prévision des crues : évaluation opérationnelle pour le cas du SPC « Seine moyenne . Yonne . Loing ». *Prévisions hydrométéorologiques (Société hydrotechnique de France, 18 - 19 novembre 2008)*.
- [4] Obled C., Zin I., et Hingray B. (2008). Choix des pas de temps et d'espace pour des modélisations parcimonieuses en hydrologie des crues. *Prévisions hydrométéorologiques (Société hydrotechnique de France, 18 - 19 novembre 2008)*.
- [5] Oudin, L., Andréassian, V., Mathevet, T., Perrin, C. et Michel, C. (2006). Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resources Research*, **42**(7), W07410, doi: 10.1029/2005WR004636.
- [6] Refsgaard, J. C. (1997). Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting. *Nordic Hydrology*, **28**, 65-84.
- [7] Singh, V. P. et Frevert, D. K., Eds. (2002a). *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*, Highlands Ranch, Colorado, Water Resources Publications.
- [8] Singh, V. P. et Frevert, D. K., Eds. (2002b). *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*, Highlands Ranch, Colorado, Water Resources Publications.
- [9] Tangara, M. (2005). Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. *Thèse de Doctorat, EPHE, Paris*, 374 p.